LES PROBLÈMES ÉCONOMIQUES DE L'ÉQUIPEMENT HYDROÉLECTRIQUE

THE ECONOMIC PROBLEMS OF HYDRO-ELECTRIC EQUIPMENT

par **P. MASSÉ**

Directeur Général Adjoint de l'Électricité de France

English synopsis p. 563

Cette conférence a été préparée et prononcée avant la grande sécheresse de 1949. Certains chiffres auront, de ce fait, à être revus. Les études en cours préciseront la portée de cette révision qui, en tout cas, n'affecte ni les principes, ni les méthodes. Autant d'ailleurs il est nécessaire de tenir compte d'un fait nouveau, même exceptionnel, autant il serait critiquable de fonder sur ce seul fait une politique d'investissement à long terme.

P.M.

I.

NATURE DES PROBLÈMES

Je crois répondre à ce que vous attendez de moi, et vous dire en même temps ce que je sais de plus valable, en vous entretenant ce soir de l'Équipement hydroélectrique. Comme je ne pourrais toutefois, sans abuser de votre patience, envisager tous les aspects de ce grand sujet, je me placerai de préférence au point de vue économique en laissant quelque peu de côté le point de vue technique, qui vous est probablement plus familier, mais qui n'est pas plus fondamental.

Economie et Technique.

Sans doute convient-il de marquer tout d'abord ce qui distingue les deux points de vue. Une définition à la fois concise et naturelle consiste à dire que le problème technique se pose en termes de quantité et le problème économique en termes de valeur. Mais peut-être les choses ne sont-elles pas si simples. Des calculs aussi évidemment techniques que celui d'un barrage, d'un revêtement de galerie, d'une poutre de pont-

roulant, se basent sur des taux de fatigue qui résultent eux-mêmes d'un arbitrage implicite entre deux exigences extra-techniques, celle de la sécurité et celle du moindre coût. Le choix entre deux types d'ouvrages — un barrage-poids et un barrage à voûtes multiples, une conduite forcée et un puits blindé — exige la connaissance des prix comparés de la main-d'œuvre, du ciment, de l'acier et des explosifs. Et pourtant, tous ces problèmes, explicitement ou implicitement traités en termes de valeur, restent l'affaire du technicien. C'est que la technique y est dominante, et met à son service un système de prix connus et indiscutables, ceux par exemple de matériaux disposant de larges débouchés.

Un problème spécifiquement économique apparaît, par contre, lorsque le système de prix — ou de coefficients de valeur — est inconnu. C'est le cas d'une entreprise fabriquant des objets de nature dissemblable, pour lesquels il n'existe pas de marché. Cette fois, la technique est dominée en ce sens que l'entreprise n'a plus à sa disposition un système de prix donné à priori, mais doit créer ses propres repères de valeur. L'équipement des chutes d'eau rentre évidemment dans cette catégorie. Une usine de lac dans les Pyrénées, une usine d'éclusée sur le Rhône, une usine au fil de l'eau sur un torrent alpestre, jurassien ou

cévenol, sont des êtres économiques de nature différente, et rien n'indique à priori au constructeur de chutes les rapports de valeur à leur assigner.

Bien entendu, de même qu'il n'y a pas, à strictement parler, de problème technique pur, il n'y a pas davantage de problème économique pur. Vous ne serez donc pas surpris d'entendre le langage du technicien s'entremêler à celui de l'économiste. Mon sujet se délimite par préférence, non par exclusion.

★★

L'analyse économique connaît actuellement dans notre pays un brillant renouveau : je n'en veux pour témoin que la Théorie du Rendement Social, et la controverse sur les tarifs des Services Publics.

Cette floraison vient à son heure, car l'économie compte plus que jamais pour notre destin. Elle est particulièrement bienvenue pour les nouveaux services nationalisés où l'unité de commandement comporte de grands avantages balancés par de grands risques. On peut admettre en effet que, dans le secteur libre, les écarts d'appréciation se compensent jusqu'à un certain point et qu'il se dégage de la diversité des opinions une sorte d'orientation moyenne, à base d'expérience et de sens commun. On peut prétendre en outre que la sanction de la perte est, pour l'industrie privée, un butoir solide sur la pente de la mauvaise gestion. Rien de tel pour une Entreprise Nationale disposant d'un monopole et placée sous la loi du Non-Profit. Soustraits à l'action de la concurrence comme à l'attrait du bénéfice, ses dirigeants se doivent de remplacer ces stimulants par un redoublement d'attention et d'autocritique dans l'ordre commercial et financier. Du fait des pouvoirs qui leur sont dévolus, ils ont une grande responsabilité morale envers le pays. Un de leurs meilleurs moyens d'y faire face est de cultiver la Science économique, guide et sauvegarde de leur action.

J'ai parfois entendu dire que la nationalisation libérerait l'industrie du souci de la rentabilité. Il n'y a pas d'erreur plus foncière. L'économiste italien BARONE a déjà montré, il y a plus d'un demi-siècle, que la planification en régime collectiviste aurait à résoudre des problèmes étrangement semblables à ceux du régime concurrentiel (je ne dis pas du monopole). M. ALLAIS a repris ces idées avec force dans sa Théorie du

Rendement Social. Et pourtant, sous des formes diverses, le malentendu subsiste.

De bons esprits croient encore, par exemple, qu'en matière d'hydroélectricité nous n'avons à nous préoccuper que de l'optimum technique, et que, par suite, notre seul objectif est l'aménagement intégral de la richesse de nos eaux. C'est oublier que l'outillage productif et les ressources matérielles sont limités, qu'il n'est pas possible, — et de loin —, de réaliser dans toutes les branches d'activité les investissements désirables, et qu'ainsi la poursuite exclusive de la perfection technique peut causer à la collectivité de grands préjudices si les ressources sont dérivées dans des voies de moindre rendement social.

Qu'on le veuille ou non, il se pose, au moment de l'élaboration d'un plan d'équipement, un problème d'optimum économique, qui est l'aspect collectif, l'aspect national, du principe de rentabilité. Il s'agit de **choisir** parmi toutes les opérations possibles, celles qui procureront les plus grandes satisfactions futures pour une dépense donnée. ou, réciproquement, qui procureront une satisfaction future donnée pour la moindre dépense actuelle (la dépense étant la mesure du sacrifice à consentir dans le présent au profit de l'avenir).

★★

Les coûts.

Le jugement à porter sur une opération d'équipement dépend, comme nous venons de le voir, de la comparaison entre des sacrifices actuels — plus brièvement des **coûts** — et des satisfactions futures escomptées — plus brièvement des **valeurs**.

Or, l'estimation des coûts et des valeurs se heurte, en hydroélectricité, à des obstacles dont une vue réaliste doit tenir compte.

La difficulté du **problème des coûts** tient avant tout à ce que les aménagements de chutes sont tributaires du **terrain**. Et par terrain, je n'entends pas seulement le relief, mais la structure, pas seulement la surface topographique, mais le substratum en profondeur. Si l'on n'avait affaire qu'à une forme géométrique, il serait à la rigueur possible d'établir des abaques permettant de « paramétrer » les projets, c'est-à-dire de calculer leur devis en fonction de quelques données simples : hauteur et largeur à obturer dans le cas d'un barrage, longueur et débit dans le cas d'une dérivation. Mais aucune formule ne saurait tenir

compte des aléas du sous-sol ⁽¹⁾. On peut dire, en schématisant, que lorsqu'on passe du rocher franc au terrain délité exigeant des boisages, coût et délais de perforation sont multipliés par 2 ; les venues d'eau de quelque importance font passer à un coefficient de l'ordre de 3 ; enfin, dans les cas heureusement rares où il faut avancer au bouclier ou injecter le terrain avant perforation, le coefficient multiplicateur est de l'ordre de 10. De même, le choix d'un type de barrage dépend moins du contour apparent du verrou que du profil rocheux en profondeur. Des accidents géologiques comme des surcreusements, des failles, des zones de broyage (qu'il n'est pas toujours possible d'éviter), obligent de grands ingénieurs comme MM. CAQUOT et COYNE à mettre en jeu toute leur virtuosité technique. Il est à peine utile d'ajouter que la construction peut être lourdement renchérie lorsque la fondation ou les appuis nécessitent des précautions ou des traitements spéciaux.

Le terrain ne dicte pas seulement le projet des ouvrages, il en commande le mode d'exécution. Ici, il conduira à équiper une ballastière dans une vallée, là à ouvrir une carrière dans un éperon rocheux. Ici il se prêtera à la multiplication des décharges et par suite des attaques d'une galerie ; là il imposera d'espacer les fenêtres. Ici, il permettra des accès faciles, des cantonnements agréables, un ravitaillement abondant ; là il obligera à user de sentiers escarpés, à construire des téléphériques, à accrocher des baraquements au flanc des montagnes, à accepter des hivernages difficiles. Les transports en altitude, lorsqu'on est mal équipé, suffisent parfois à inverser le rapport courant des valeurs. Je me souviens encore de ma surprise lorsqu'il y a quelque vingt ans, un de mes Ingénieurs me démontra, chiffres en mains, qu'ayant à construire une cantine vers la cote 2.500, nous gagnerions à démonter une baraque de la plaine, pour n'avoir pas à transporter, dans les fibres de planches neuves, un poids d'eau mort. Il préfigurait sans s'en douter, pour des raisons d'ailleurs bien analogues, la politique de dessiccation des aliments qui, pendant la dernière guerre, devait économiser aux Alliés un tonnage si précieux.

Il faut bien voir, par ailleurs, que nous sommes en voie d'évolution constante vers la méca-

nisation des chantiers. Il y a un écart considérable, par exemple, entre les techniques anciennes et nouvelles de perforation des galeries. L'introduction des jumbos, des pelles chargeuses, des locotracteurs, de l'éclairage électrique, de la signalisation des voies, pose le problème des coûts en termes nouveaux. Avant le démarrage d'un chantier, il faut déterminer son degré optimum de mécanisation, correspondant au juste équilibre entre l'économie de main-d'œuvre et les charges de matériel. L'expérience du passé ne nous fournit plus de références de prix applicables à ces conditions nouvelles. Aux inconnues du terrain s'ajoute — surtout pour les grands ouvrages — le caractère inédit de la technique d'exécution.

Disons enfin que l'économie des travaux dépend du succès avec lequel le maître de l'œuvre saura assurer la continuité des équipements dans une même vallée, en réutilisant d'un chantier à l'autre le matériel, les baraquements, les équipes et l'organisation des entreprises.

Je serais incomplet si je ne mentionnais pas, au terme de ce rapide tour d'horizon, les coûts indirects, c'est-à-dire la compensation des préjudices causés aux hommes et aux choses, spécialement élevés dans un vieux pays comme le nôtre où les grandes œuvres ne peuvent s'accomplir sans heurter des intérêts ou des sentiments. Ces coûts indirects ne peuvent d'ailleurs faire l'objet, à priori, que d'estimations relativement incertaines, les termes des accords amiables ou des décisions judiciaires ne pouvant être préjugés.

Pour toutes ces raisons, la mesure des coûts est une de nos tâches les plus délicates. Pour établir un devis, il ne suffit pas de la science d'un calculateur. Il faut l'art d'un expert.

★★

Les valeurs.

L'appréciation des **valeurs**, comme celle des coûts, rencontre des difficultés tenant aux caprices de la nature. Après le terrain, c'est le climat qui entre en scène ; après la géologie, l'hydrologie. La production d'une chute dépend de ses débits, et ceux-ci ne sont connus qu'en probabilité. Les lois de probabilité elles-mêmes sont souvent fort incertaines, à cause de l'insuffisance des observations, tant en nombre qu'en

(1) Rappelons qu'à Panama, où Ferdinand de Lesseps avait prévu 45 millions de mètres cubes de terrassement et Couvreux 75 millions pour un canal de niveau, le chiffre final a atteint 300 millions pour un canal à écluses, principalement à cause des glissements de la Culebra.

valeur. L'Annuaire Hydrologique de la France a eu peine, on le sait, à sélectionner 68 stations disposant de relevés sur une période suffisamment longue pour réduire à un taux acceptable « l'erreur d'échantillonnage ». Et encore ces stations sont-elles en général d'altitude insuffisante, eu égard à certains des projets en cours d'exécution ou d'étude. Les Services d'Electricité de France et ceux de la Direction de l'Electricité s'efforcent de remédier à ces manques en installant des stations nouvelles et en développant l'étude des corrélations. Mais c'est œuvre de longue haleine.

A côté de ces difficultés, qui sont d'application plutôt que de principe, il en est qui tiennent à la notion même de valeur.

La première est bien connue des économistes. C'est que lorsque plusieurs facteurs de production concourent à l'obtention d'un produit — ici plusieurs usines à la « fabrication » d'une « montagne de charge » —, il n'est pas possible, en général, de définir la « part qui revient » à chaque facteur. Réciproquement, lorsqu'un processus de production permet d'obtenir plusieurs produits ou plusieurs services liés, il n'est pas possible, en général, de définir le coût « normal » à imputer à chaque produit ou service. Cette difficulté réciproque a été rencontrée par les administrateurs de la T.V.A. qui avaient à répartir la charge des barrages du Tennessee entre la navigation, la défense contre les crues et la production d'énergie électrique. Une douzaine de variantes ont été proposées et confrontées sans qu'aucune d'elles s'impose absolument ⁽¹⁾.

Il existe, à la vérité, un cas où la difficulté s'évanouit : c'est celui de l'indépendance des coûts ou services. Lorsque, par exemple, le service rendu par un des facteurs de production est indépendant du nombre et de la quantité des autres facteurs utilisés, il constitue une mesure, invariante et intrinsèque, de la valeur de ce facteur. C'est approximativement le cas des puits de mine, des raffineries de pétrole, dont les productions sont additives en quantité et en valeur. C'était celui des chutes d'eau à l'époque où la technique du transport balbutiait, et où chaque usine hydraulique desservait une clientèle isolée.

L'interconnexion a changé la face des choses. Le super-réseau n'est pas seulement un moyen de transport, c'est aussi un réceptacle grâce auquel les énergies de qualité différente se conjuguent pour la desserte d'une clientèle unique. Dès lors, intervient la compensation des régimes. Un des éléments de la valeur d'une chute est la discordance de son régime hydrologique par rapport au régime moyen français. L'indépendance cède le pas à la complémentarité.

Est-ce à dire que, dans ces conditions nouvelles, la notion de valeur échappe à l'analyse économique? Nullement. Mais ce qu'on peut définir avec exactitude n'est qu'une **valeur marginale** : le service rendu par un facteur de production intervenant **à la marge** du système préexistant,

S'il y a par exemple 3 facteurs de production, employés en quantités respectives x, y, z , et rendant un service $S(x, y, z)$ il n'est pas possible — hors le cas d'indépendance — de définir sans une convention plus ou moins arbitraire la part de S revenant respectivement à chacun des trois facteurs. Par contre, le service rendu par l'emploi d'une unité supplémentaire du facteur x est

sans ambiguïté la dérivée partielle $\frac{\partial S}{\partial x}$.

L'économiste sait ainsi définir dans tous les cas des valeurs marginales. Mais celles-ci n'ont un sens précis qu'à l'époque et dans les conditions où on les calcule, c'est-à-dire pour une modification différentielle du système de production. Quand le facteur nouveau s'intègre dans une modification finie, il n'est plus certain que sa valeur marginale coïncide encore avec le service rendu. Plus même : le service rendu s'entoure d'un certain halo. Il y a en quelque sorte diffraction de la valeur ⁽¹⁾.

Cette diffraction de la valeur est d'ailleurs accrue par la diffraction de la certitude dont parle Paul LANGEVIN ⁽²⁾. Les goûts et les besoins se modifient, des inventions bouleversent les techniques, dans des proportions et à un rythme qu'il nous est impossible de deviner.

(1) On trouve une analyse de cette question dans un intéressant rapport de M. René LAMBERT au Ministère de la France d'Outre-Mer : « Programme administratif et résultats de la Tennessee Valley Authority ».

(1) Précisons que, par contre, la valeur d'une modification finie — par exemple la valeur du Plan Monnet — est quelque chose de bien déterminé, à l'instant de son entrée en service.

(2) « Il n'y a de certitude que du présent, et celle-ci se diffracte à mesure que nous cherchons à en suivre les répercussions dans l'avenir. » Paul LANGEVIN (Septième Semaine Internationale : « La Statistique. Ses applications. Les problèmes qu'elles soulèvent » « Statistique et déterminisme ».)

Sans doute pouvons-nous prévoir, cinq ou dix ans à l'avance, l'évolution moyenne de l'économie et des rapports de valeur. C'est la raison pour laquelle on peut parler sans présomption sinon sans risque de plans quinquennaux ou décennaux. Mais les anticipations plus lointaines commencent à relever des Jules Verne et des Wells.

Il en résulte que les valeurs marginales doivent être maniées — et surtout extrapolées — avec précaution, en se gardant toutefois de l'excès inverse qui consisterait à les traiter comme de simples jeux de l'esprit. Les réserves qu'appelle le marginalisme et la portée pratique de ces réserves sont assez bien illustrées, à mon sens, par l'exemple que voici.

Il est connu que la valeur de l'énergie d'hiver est actuellement supérieure à celle de l'énergie d'été. Supposons alors que, tirant la conséquence de cette situation, on donne, toutes choses égales d'ailleurs, la préférence aux chutes de régime pluvial sur celles de régime nival ou glaciaire. Si cette préférence se traduit par des équipements massifs, le jour peut venir où la situation s'inversera, où les pénuries se feront sentir en été, et où, par suite, le rapport des valeurs marginales subira une brusque mutation. Théoriquement, cette mutation est possible, et nous ne devons pas l'écarter du champ des éventualités. Mais pratiquement elle ne l'est guère parce que, pour des raisons de continuité, d'exécution matérielle, de division des risques, l'équilibre des régimes hydrologiques dans la production nationale se modifie avec une lenteur suffisante pour que nous ne soyons jamais pris au dépourvu.

★★

Je viens de rappeler que la mesure des valeurs ne peut se faire avec précision qu'« à la marge ». Il me reste à traiter une dernière question, et non la moindre : que faut-il entendre par valeur dans le cas des chutes d'eau ? La première réponse qui vient à l'esprit est que la valeur (marginale) d'une usine hydraulique (nouvelle) est mesurée par la consommation (supplémentaire) qu'elle permet de desservir. Toutefois, on n'a pas réussi, jusqu'à présent, à élaborer dans cette voie des normes cohérentes de valeur. La raison en est que si chaque usine hydraulique est un être économique qualitativement distinct, il en est de même de chaque diagramme de con-

sommation. Cette manière d'aborder la question ne fait donc que déplacer la difficulté. Elle conduit en fait à un problème d'optimum économique plus large que celui de la production au moindre coût : celui de l'ajustement mutuel de l'équipement et des tarifs. C'est une seconde étape que je n'aborderai pas.

★★

Le problème de la production au moindre coût consiste à se donner à priori, par une analyse aussi serrée que possible du développement probable des besoins, le diagramme de consommation à desservir et le taux de garantie désiré. (L'hydroélectricité étant soumise aux aléas du climat, on n'a jamais la certitude absolue, mais une probabilité plus ou moins voisine de 1 d'éviter toute défaillance).

Les usines possibles, tant hydrauliques que thermiques, étant au nombre de n , et les équipements correspondants mesurés avec des unités convenables étant $e_1, e_2, \dots, e_n$ (certains de ces nombres pouvant être nuls), la condition de desservir le diagramme de consommation G avec la garantie α se traduit par une relation

$$g(e_1, e_2, \dots, e_n) = 0$$

qui définit dans l'espace à n dimensions une « hypersurface de garantie » à $n - 1$ dimensions.

Le problème de l'optimum consiste dans la recherche du point de moindre coût sur cette hypersurface ⁽¹⁾.

En ce point, comme il est classique, tout déplacement différentiel sur l'hypersurface (représenté par un vecteur infinitésimal situé dans l'hyperplan tangent) doit être tel que la différentielle première du coût soit nulle et la différentielle seconde positive.

En pratique, quelles que soient l'expérience et l'intuition des experts chargés de la préparation du Plan d'Équipement, le point $(e_1, e_2, \dots, e_n)$ obtenu en première approximation ne sera pas le point optimum. On pourra alors améliorer le projet de Plan en recherchant les substitutions avantageuses, c'est-à-dire celles qui, en rempla-

(1) Cet énoncé suppose que l'on fait abstraction de la valeur des excédents aléatoires, variables d'un point à l'autre de l'hypersurface. En toute rigueur, il faudrait minimiser le coût diminué de la valeur probable des excédents.

çant une opération par une autre, rendent négative la différentielle première du coût.

★★

Jusqu'à présent, remarquons-le, nous avons traité d'une manière entièrement symétrique la production hydraulique et la production thermique. La solution peut être obtenue d'une manière complète dans cette voie. Mais il est possible d'aller un peu plus loin en tenant compte de la nature particulière de la production thermique. Celle-ci est incomparablement moins assujettie que la production hydraulique à la variabilité des terrains et des climats. En stylisant un peu, on peut assimiler tout le thermique ⁽¹⁾ à un équipement unique T ayant un coût d'investissement par kW et une consommation de charbon par kWh parfaitement définis. Considérons alors une des chutes e_i . Si nous la supprimons du programme, nous passons d'un point P de l'hypersurface de garantie à un point P' voisin, situé du côté des moindres consommations garanties. Nous pouvons revenir sur l'hypersurface par un petit segment P' P'' parallèle à l'axe thermique OT. On voit ainsi qu'on ne change pas la consommation desservie dans les conditions de garantie données en substituant à l'usine hydraulique e_i représentée par le petit segment P' P (puisque $P'P = e_i$) l'équipement thermique supplémentaire représenté par le petit segment P' P''. Nous pouvons ainsi définir la valeur de n'importe quelle usine hydraulique par substitution thermique : par définition, cette valeur sera prise égale au coût de la production thermique économisée, à consommation égale desservie dans les mêmes conditions de sécurité. Il s'agit ici, bien entendu, du coût **total** : c'est-à-dire à la fois des charges fixes et des frais de combustible, le premier élément ayant reçu le nom de « valeur en garantie », et le second celui de « valeur en charbon » ⁽²⁾.

Je rappellerai à cet égard qu'avant la guerre le système de production français était caractérisé, — principalement pour des raisons historiques —, par une certaine surabondance de

l'équipement thermique, qui faisait apparaître la régularisation comme quelque chose de facile, je dirais presque de donné gratuitement. Il en résultait une tendance à négliger la valeur en garantie pour ne considérer que la valeur en charbon. D'où un effet général de dévalorisation des équipements nouveaux, et un effet particulier de dévalorisation des usines de lac par rapport aux usines au fil de l'eau. Cette seconde circonstance explique sans doute qu'en 1939 l'énergie accumulée atteignait seulement 7 % de productible hydraulique. Retenons-en pour l'avenir que le calcul des valeurs marginales n'est correct qu'à partir d'une situation d'équilibre.

J'ajouterai une considération de haute importance ; c'est que les groupes thermiques les plus modernes ont une consommation spécifique de charbon moitié de celle des groupes thermiques anciens. L'éventail des consommations spécifiques est donc largement ouvert ; mais comme la course vers les hautes températures et les hautes pressions tend à s'essouffler, le déclassement progressif des groupes anciens va conduire, à vues humaines, à refermer l'éventail. Ainsi, dans la situation présente, toute opération nouvelle d'équipement hydraulique permet, à consommation égale, des économies substantielles de charbon (et d'entretien). Mais il ne faut pas perdre de vue que toute opération nouvelle d'équipement thermique a un effet du même ordre. On doit en tenir compte, comme on le verra à l'annexe I, dans la conjugaison optimum de l'hydraulique et du thermique.

★★

L'interférence des programmes.

Un dernier aspect du problème mérite d'être signalé : c'est qu'il n'est pas possible de considérer le plan en cours d'élaboration, abstraction faite des plans qui lui succéderont dans le futur. Il pourrait arriver en effet que la suite des optimums économiques « instantanés », définis en choisissant à chaque époque les meilleures opérations du moment, ne réalisât pas l'optimum économique « dans la durée », qui est le véritable objectif de notre action. Il en serait ainsi, en particulier, si, en considération du seul présent, nous étions conduits à « écrémer » les sites dont nous disposons, par exemple à équiper les rapides d'une rivière sans nous préoccuper d'un aménagement d'ensemble rationnel. Nous ferions une bonne opération, mais nos successeurs plus

(1) Ou du moins tout le thermique nouveau.

(2) J'ai introduit ces deux notions sous la forme d'indice-charbon et d'indice-puissance dans la note S.H.F. N° 11, en date du 19 avril 1941, en même temps que je développais un calcul de l'indice-charbon.

M. AILLERET a défini un indice-puissance en proposant en juillet 1944 un critère de franchissement des hivers secs.

Enfin, M. HALPHEN a rattaché ces notions à des bases statistiques dans deux articles publiés par l'Annuaire Hydrologique de la France : « Le problème du plan de développement de la production d'énergie électrique », Année 1945.

« Sur la valeur industrielle d'une chute d'eau », Année 1946.

ou moins lointains en feraient une mauvaise. Un bilan s'impose donc.

Le bilan n'est pas toujours défavorable, et si nous court-circuitons aujourd'hui Chedde par Passy, Viclaire par Malgovert, Gavet par Péage-de-Vizille, Arras par Nouaux, il ne faut pas en conclure que nos prédécesseurs ont eu tort en limitant leurs ambitions. L'écémage se justifie quand l'aménagement partiel est nettement plus avantageux que les équipements susceptibles d'être réalisés sur d'autres rivières, l'aménagement intégral étant au contraire nettement plus désavantageux ⁽¹⁾, et quand en outre le laps de temps paraissant, à vues humaines, devoir séparer leur exécution, est suffisant pour que les bénéfices intercalaires de l'opération compensent, en valeur actuelle, son surprix définitif.

Bref, il ne faut ni sacrifier l'avenir au présent, ni le présent à l'avenir, mais faire une juste pesée des exigences de chacun.

★★

Les conditions du choix.

Le problème tel qu'il vient d'être posé est, **en théorie**, justiciable d'une solution rigoureuse.

Mais il en va différemment **en pratique**, à cause des calculs complexes et délicats qu'il faudrait faire sur chacune des chutes possibles, et cela non seulement pour le programme actuel, mais pour toute la succession des programmes futurs.

Cette tâche est trop vaste pour nos forces. Il faudrait au bas mot une dizaine d'années de méditations, d'études sur la carte, de reconnaissances sur le terrain, d'élaboration de devis comparatifs pour établir sur des bases entièrement rationnelles le plan d'équipement progressif de nos richesses hydrauliques. Le prix et le délai de cette réflexion ne nous sont pas accordés. Nous devons aller de l'avant, même s'il subsiste autour de nous des zones d'ombre.

Telles sont les **conditions de notre choix**. Nous sommes obligés de nous décider sur des données nécessairement incomplètes. J'entends bien que ces décisions se prennent en deux temps. Parmi toutes les virtualités qui s'offrent à nous, nous faisons un tri préliminaire : celui des chutes que nous retenons pour une étude approfondie et

pour l'accomplissement des formalités de concession. Nous nous efforçons ainsi d'avoir « en portefeuille » plus de chutes que nous ne pouvons physiquement et financièrement en entreprendre. Mais si cette ligne de conduite nous permet d'abandonner sans dommage les projets dont l'étude révèle de trop lourds aléas, il n'en reste pas moins que la composition de notre portefeuille préfigure dans une large mesure celle de nos programmes futurs.

Nous sommes ainsi conduits à rechercher des **critères approchés** dont nous ne pouvons pas garantir qu'ils conduisent en toute circonstance au juste choix, mais qu'en l'état actuel de nos connaissances, aucun autre critère ne pourrait avantageusement remplacer.

Pour l'élaboration de ces critères, nous avons en premier lieu à nous inspirer de la continuité avec le passé. Le problème de la qualité des chutes s'était posé bien avant la guerre et une solution empirique, qui n'était pas sans mérite, lui avait été donnée il y a un quart de siècle par U. P. E. P. O. sous forme d'une échelle reliant l'énergie de 24 heures, l'énergie de 14 heures, l'énergie d'éclusée, l'énergie de lac, etc... A la vérité, l'objet principal de cette tentative n'était pas tant de définir des critères d'équipement que de répartir « équitablement » la recette d'une entente entre ses divers adhérents. Mais les deux choses ne peuvent être séparées ; tout système de prix a une fonction axée sur le présent et une fonction orientée vers l'avenir : en même temps qu'il fixe les satisfactions à tirer des revenus acquis, il dirige l'activité d'investissement et la formation des revenus futurs.

Quoi qu'il en soit, sur la base de normes empiriques comme celles que je viens de rappeler, ou par expérience et par instinct, les anciennes sociétés avaient élaboré une gamme de projets dont on peut considérer qu'ils satisfaisaient pour la plupart au principe de rentabilité. Je serais le dernier à avoir le droit de sous-estimer un héritage que j'ai contribué pour une faible part à constituer, et sans lequel l'Electricité de France n'aurait pu remplir sa mission. Il serait, au surplus, absurde de supposer que les anciennes sociétés cherchaient à faire de mauvaises affaires en produisant cher. Dans leur optique, les projets qu'elles avaient élaborés étaient, sauf exception, parmi les meilleurs. Ce sont d'ailleurs ces projets qui, soit tels quels, soit légèrement amendés, constituent l'essentiel du programme en cours d'exécution, Electricité de France

(1) Il ne viendra donc qu'à son heure, lorsque le jeu du rendement décroissant l'amènera en tête de liste.

s'étant contentée d'une inflexion vers les usines puissantes et les grands réservoirs, de manière à concentrer son effort d'équipement et à forcer sa production d'énergie d'hiver.

Mais, quels que soient les mérites de ces études anciennes, deux observations s'imposent. La première, c'est que leur vertu est en grande partie épuisée par le vigoureux effort d'équipement inclus dans le Plan Monnet. La seconde, c'est que l'optique a changé. Le nombre même des anciennes sociétés tendait, pour des raisons administratives, commerciales et financières, au morcellement des équipements. Telle entreprise s'enfermait dans les limites de sa vallée ; telle autre adaptait la taille de ses usines à la progression escomptée des besoins d'une étroite clientèle ; telle autre enfin proportionnait ses réalisations aux capitaux que sa structure financière lui permettait de réunir sans risques majeurs. Certes, les anciennes sociétés cherchaient à échapper à ce cloisonnement en passant des contrats d'échange et en constituant des entreprises en participation pour les aménagements importants. Le programme de 1938 par exemple témoigne d'un certain élargissement des points de vue. La situation d'Electricité de France est toutefois plus facile. Sa clientèle est la nation tout entière. Son risque financier n'a pas disparu, mais se mesure à une autre échelle. Enfin, elle a en mains, au lieu de morceaux de puzzle, la carte de France, et peut dessiner avec un esprit plus libre et des vues plus larges l'architecture du système tout entier ⁽¹⁾. Il y a là une sérieuse incitation à reprendre l'examen du problème pour son propre compte, en essayant de penser l'équipement et l'exploitation comme un tout. C'est là une tentative indispensable, mais difficile, dont je vais essayer de retracer les premiers résultats.

II.

ÉLÉMENTS DE DOCTRINE

Au risque de décevoir certains, je commencerai par avouer qu'Electricité de France n'a pas de doctrine, si toutefois il faut entendre par là un ensemble de principes d'un caractère officiel et impératif. Au cours de notre brève existence,

nous avons dû agir avant de philosopher. Aussi notre vérité n'est-elle pas formée, mais en formation. Nous pensons en outre que la liberté de pensée, l'indépendance dans le conseil, ne sont pas incompatibles avec la discipline dans l'action, mais peuvent au contraire la fortifier et l'enrichir.

Pourtant, nous ne nous gouvernons pas au hasard. Si nous n'avons pas de doctrine, nous avons — chacun saisira la nuance — ce que j'appellerai des **éléments de doctrine**. Je vais essayer de les dégager en passant en revue les problèmes successifs posés par l'élaboration d'un Plan d'Equipement hydroélectrique.

★ ★

1° L'électricité parmi les activités de base.

La première question que pose l'élaboration d'un Plan est de définir la place de l'équipement électrique parmi les investissements généraux du pays, reconstruction, chemins de fer, ports et routes, marine marchande, agriculture, charbonnages, carburants, sidérurgie, etc...

Ce problème d'optimum économique déborde mon sujet et — j'en conviens volontiers — ma compétence. Les thèses avancées de part et d'autre en faveur de telle ou telle activité de base ont des juges naturels, le Commissariat Général du Plan et la Commission des Investissements au Ministère des Finances. On conçoit d'ailleurs que les juges éprouvent parfois quelque embarras à se prononcer. Leur jugement est cependant facilité, dans le cas de l'électricité, par un aspect de la conjoncture, non pas seulement française, mais mondiale. C'est que dans tous les pays du monde, du fait du dépérissement des installations anciennes, du trouble apporté aux constructions nouvelles par la guerre mondiale, et par dessus tout de la croissance vigoureuse des besoins, l'effort d'équipement électrique bat son plein. L'optimum théorique exigerait que les ressources productives de toute nature, — en hommes, en matériaux, en capitaux —, fussent dérivées vers la construction des usines et des lignes électriques jusqu'au moment où l'équilibre des utilités marginales s'établirait entre cette branche d'investissements et les autres activités de base. Mais ce virement des ressources, facile pour les crédits, l'acier, le ciment (c'est une question de volonté et d'autorité du répartiteur, dans les cas où il subsiste), possible pour la main-d'œuvre non qualifiée et

(1) A condition que ne se développent pas certaines tendances au démembrement qui retireraient à la nationalisation un de ses avantages les plus clairs.

le matériel d'entreprise, se heurte aujourd'hui, avant que l'équilibre ne soit atteint, à la **limite du potentiel spécifique de l'équipement électrique**, c'est-à-dire au plein emploi de l'outillage des constructeurs de matériel électromécanique et — dans une mesure un peu moindre mais non négligeable — de la main-d'œuvre qualifiée correspondante. On est ainsi conduit à un **régime bloqué** où le désir de forcer la cadence à cause de l'utilité économique des investissements marginaux ⁽¹⁾, se heurte à l'impossibilité physique créée par un « goulot d'étranglement ». Cette situation est à bien des égards regrettable ; elle a du moins l'avantage de simplifier le débat, toute réduction de cadence au-dessous de la limite définie plus haut entraînant des pertes d'utilité considérables et manifestes ⁽²⁾.

Je ne dis pas, bien entendu, que la schématisation précédente traduise en détail la situation mondiale, non plus que la situation française. Les années qui ont suivi immédiatement la libération ont été marquées par une grave pénurie d'acier qui a constitué notre premier goulot d'étranglement. Le freinage financier, en même temps qu'il retardait le démarrage de certains aménagements-clés, nous a fait perdre l'assurance précieuse contre les risques d'avenir que constituait l'avance des travaux de génie civil. Du moins le plein emploi du potentiel spécifique d'équipement électrique reste-t-il l'objectif que les différents Etats doivent raisonnablement s'assigner. Selon les évaluations les plus plausibles, il correspond, pour notre pays, à un accroissement annuel de 600.000 kW de la puissance thermique installée et de 2,5 milliards de kWh du productible hydraulique.

J'ajouterai un dernier mot pour répondre à une question qui vient naturellement à l'esprit. Le potentiel spécifique d'équipement électrique ne peut-il être développé, de manière à supprimer le goulot d'étranglement dont je viens de parler ?

La chose est certainement possible, en premier lieu par la normalisation des commandes que facilite l'unité de conception. Les machines thermiques et les transformateurs ont déjà fait

l'objet d'une standardisation assez poussée. Même dans le domaine des machines hydrauliques où la diversité des sites complique la tâche, une harmonisation intéressante a pu être obtenue (hautes chutes de Capdelong et Roselend, basses chutes sur le Rhône et le Rhin).

Pour aller plus loin, des investissements préalables sont nécessaires chez les constructeurs. On comprendra qu'il faille, pour les réaliser, certaines garanties de stabilité des programmes, ou tout au moins un acte de foi dans l'avenir.

2° Les nouvelles sources d'énergie.

Avant d'aborder l'étude économique des sources classiques d'énergie électrique, — les combustibles pour le thermique, les cours d'eau pour l'hydraulique —, je dirai un mot rapide des sources nouvelles que les progrès de la science font entrevoir : les marées, le vent, l'énergie nucléaire, la houle, l'énergie thermique des mers.

M. AILLERET a fait le point de ces questions il y a un an, au moment où il prenait la présidence de la Société Française des Electriciens ⁽¹⁾, et je ne puis qu'engager les lecteurs de cet article à se reporter à sa remarquable conférence. J'en retiendrai seulement ici que l'énergie thermique des mers n'est utilisable que dans les régions tropicales ou équatoriales, que le captage de l'énergie des vagues « n'est pas encore un problème résolu ou tout au moins mettrait en jeu des travaux à la mer très coûteux », et qu'enfin les études en cours n'ont pas encore permis de discerner si les coûts d'équipement du kWh de marémotrice et d'aéromoteur, ainsi que du kW de centrale nucléaire, se situent à un niveau intéressant dans l'échelle des prix de revient. Il y aura un jour un problème économique des nouvelles sources d'énergie. Les données en sont aujourd'hui trop incertaines pour que je puisse en parler utilement.

3° Le thermique inéluctable.

Jusque vers 1936, l'énergie thermique a joué un rôle prépondérant dans l'alimentation de notre pays, la technique du transport ne permettant pas encore d'alimenter massivement les centres de consommation du Nord de la France

(1) Cette utilité découle de l'importance des besoins, du fait qu'ils pourront être satisfaits à des conditions économiques (prix de l'électricité à un coefficient inférieur à celui du charbon) et de la nécessité prochaine de déclassements d'usines massifs.

(2) Il faut noter, au point de vue de la théorie, qu'un déplacement du premier ordre à partir d'un point d'équilibre n'entraîne qu'une perte d'utilité du second ordre ; le même déplacement à partir d'un point de blocage entraîne une perte du premier ordre.

(1) P. AILLERET : « L'évolution probable de la production et de la distribution de l'énergie électrique ». (Bulletin de la Société Française des Electriciens, N° 80, avril 1948).

à partir des régions de production hydraulique. Depuis que l'interconnexion s'est étendue à l'ensemble du territoire, il n'y a plus de limitation physique à la progression de l'hydraulique, mais seulement une limitation économique.

Si nous recherchons, dans ces conditions nouvelles, les raisons pour lesquelles nous brûlons du charbon (ou d'autres combustibles) dans des centrales électriques, nous sommes amenés à différencier le thermique en trois catégories :

1° **le thermique bas-produits**, qui correspond au « fleuve » de charbons non marchands, de gaz hauts fourneaux à faible pouvoir calorifique, voire même de résidus urbains, dont la transformation en énergie électrique constitue pratiquement le seul débouché ;

2° **le minimum technique**, c'est-à-dire la puissance thermique maintenue en fonctionnement au voisinage des grands centres pour parer aux incidents de lignes ;

3° **le thermique de régularisation** destiné, concurremment avec les réservoirs, à parer aux fluctuations, prévisibles ou imprévisibles, de la conjoncture et de l'hydraulicité.

Les deux premières catégories, dont la première est de beaucoup la plus importante, constituent ce qu'on pourrait appeler le **thermique inéluctable** ⁽¹⁾, dont le champ d'action ne découle pas de strictes considérations de prix de revient de l'électricité, mais de la coordination, sur un plan supérieur, de nos politiques électrique, charbonnière, sidérurgique et pétrolière. Il est clair, d'ailleurs, que l'utilisation de bas produits ne disposant pas de marché propre se fait à un prix d'ordre qui ne peut servir de base à un calcul d'optimum. C'est plutôt du prix du kWh, supposé connu, qu'il faudrait chercher à déduire, par un processus inverse, le prix des combustibles inférieurs.

Au contraire, l'importance à donner au thermique de régularisation par rapport à l'hydraulique (fil de l'eau + réservoirs) pose un véritable problème d'optimum que je vais considérer maintenant.

Précisons, pour fixer les ordres de grandeur, qu'à l'achèvement du Plan Monnet, en regard d'une consommation de 40 milliards de kWh, le thermique inéluctable représentera environ 12 milliards de kWh, et l'ensemble Hydraulique

que + Thermique de régularisation 28 milliards de kWh

4° **L'équilibre Thermique - Hydraulique Réservoirs.**

Comme je viens de l'expliquer, nous ne pouvons jouer, dans l'établissement de cet équilibre, que sur l'hydraulique d'une part, le thermique de régularisation d'autre part.

Les directives assignées par le Plan Monnet reposaient sur des raisons de continuité, infléchies par le souci de l'économie de charbons marchands et du développement harmonieux de l'hydraulique. C'est ainsi que **la part moyenne de l'hydraulique** dans la couverture des 40 milliards de kWh de besoins était prévue comme devant monter à 60 %, soit 24 milliards de kWh environ.

Ce développement de l'hydraulique, joint à un recul du thermique de régularisation par rapport au thermique inéluctable, de marche moins souple, a conduit à envisager une augmentation substantielle de la **part des réservoirs**.

Avant la guerre, cette part était d'environ 7 % de la production hydraulique. Notre programme prévoit de la porter à 11 %. Elle se rapprocherait ainsi des taux, de l'ordre de 12 %, qui prévalent en Italie et en Suisse.

On a objecté qu'ayant des réserves minières, nous n'avons pas à aller aussi loin que nos voisins dans la constitution de réserves hydrauliques. Il ne faut pas oublier, en sens inverse, que, malgré l'abondance des réservoirs, la pauvreté thermique de l'Italie et de la Suisse a pour contrepartie une irrégularité saisonnière de la consommation que nous aurions quelque peine à supporter. Il ne faut pas oublier non plus que, par la voie des échanges internationaux, le thermique intervient indirectement dans le bilan énergétique d'un pays comme la Suisse qui tend à exporter en été et à importer en hiver, « l'étranger étant mieux à même de combler les déficits en énergie hivernale en recourant à ses installations thermiques ⁽¹⁾ ».

Si intéressante soit-elle, la discussion précédente ne va pas au fond du problème. Le véritable critère économique ne réside pas dans la

(1) ou irremplaçable.

(1) Etude économique sur l'approvisionnement du pays en énergie pendant l'hiver 1928. Service Fédéral des Eaux.

limitation intuitive de telle ou telle de nos ressources, mais dans le développement de chacune d'elles à l'optimum.

Ce développement optimum peut d'ailleurs être conçu dans le cadre national, ou dans le cadre élargi permis par le progrès technique. En dotant notre pays simultanément de gisements de charbon et de sites de réservoirs, la nature l'a voué à régulariser dans une certaine mesure les pays moins favorisés. Cette vocation n'a en principe d'autre limite que celle assignée par la recherche du moindre coût.

On trouvera à l'annexe I une esquisse de ce que pourrait être une étude rationnelle de l'optimum. Je me contenterai ici de quelques indications générales.

Il y a, dans chaque Plan d'Équipement, un équilibre à tenir entre le thermique de régularisation, l'hydraulique au fil de l'eau et les réservoirs saisonniers, et cela pour deux raisons. La première, c'est que les opérations possibles — au moins celles des deux dernières catégories — obéissent à la loi des coûts croissants. La seconde, plus importante encore, provient de la complémentarité des moyens de production de nature différente : par exemple, le service rendu par le kWh accumulé décroît lorsque le taux des réserves ⁽¹⁾ augmente. Cette circonstance tient au fait que la **période critique** de l'année, pendant laquelle des destockages peuvent être nécessaires, augmente en même temps que le taux des réserves. Limitée à décembre pour un taux de 1 %, elle atteint trois à six mois pour les taux usuels ⁽²⁾. Il faut ainsi de plus en plus de kWh accumulés pour régulariser de moins en moins d'excédents. Autrement dit il y a, pour chaque catégorie d'équipements, une loi des services décroissants en fonction de sa part relative dans le total. D'où un second facteur d'équilibre.

Si l'on considère l'équilibre global, on peut assimiler le thermique à un équipement unique T, l'hydraulique au fil de l'eau à un équipement unique H, les réservoirs à un équipement unique R. L'hypersurface de garantie correspondant à la desserte de la consommation avec le taux

de garantie α devient une surface ordinaire dans l'espace à 3 dimensions. Si on coupe cette surface au point M par 3 plans perpendiculaires aux axes de coordonnées, on obtient 3 courbes dont les pentes sont les **taux marginaux de substitution** d'un équipement dans un autre à consommation et garantie constantes. Par exemple le taux marginal de substitution σ_{RH} des réservoirs en hydraulique au fil de l'eau est l'accroissement de l'équipement hydraulique nécessaire pour compenser une unité de moins dans l'équipement en réservoirs (l'équipement thermique, la consommation et la garantie ne changeant pas). Dire, par exemple, que $\sigma_{RH} = 5$, signifie qu'on maintient la même consommation garantie en substituant 500 millions de kWh de production au fil de l'eau à 100 millions de kWh d'accumulation. Cela ne veut pas dire que l'on puisse accepter pour le kWh accumulé un coût quintuple de celui du kWh produit au fil de l'eau. Si en effet, dans notre exemple, 500 millions de kWh au fil de l'eau correspondent à la même consommation garantie que 100 millions de kWh en réserve, ils économisent sensiblement plus de charbon.

En poussant le calcul comme il est indiqué à l'annexe I, on obtient à l'équilibre deux relations linéaires et homogènes entre les coûts d'investissements marginaux p_T , p_H , p_R du kilowatt thermique, du kWh produit au fil de l'eau et du kWh accumulé, et le prix du charbon p_c . Si l'on accepte la référence thermique, on en déduit les prix d'investissement limite p_H et p_R en fonction de p_T et p_c .

Cette solution comporte toutefois trois points délicats :

1° Elle exige la connaissance des taux marginaux de substitution et des économies marginales probables de charbon, ces éléments n'étant eux-mêmes accessibles au calcul qu'à partir d'une **schématisation** de la réalité. A ma demande, M. HALPHEN s'est courageusement attaqué à ce problème. Mais ses hypothèses appellent certaines réserves, notamment en ce qui concerne l'influence du transport, l'incidence des écrêtements de débits et le mode d'exploitation des réservoirs. Il admet pour ce dernier la consigne dite de **sécurité** qui consiste à ne destocker les réserves que pour parer aux défaillances, c'est-à-dire après avoir fait appel par priorité à tous les autres moyens de production, même aux thermiques les plus coûteuses. Il sacrifie ainsi systématiquement

(1) Taux des réserves = $\frac{\text{Réserve globale}}{\text{Productible hydraulique global}}$

(2) Je ne précise pas davantage ; car, dans le concret, d'autres aléas que celui de l'hydraulicité interviennent dans la fixation de la période critique.

quement l'économie à la sécurité ⁽¹⁾. On trouvera à l'annexe II une discussion de cette question dont l'importance, tant théorique que pratique, est considérable.

2° Les trois prix d'investissement p_T p_H p_R peuvent être considérés comme connus, aux aléas près d'exécution des travaux, au moment de l'élaboration du Plan d'Équipement. Au contraire, le prix du charbon p_c est celui qui interviendra, pendant toute la durée des ouvrages, dans les comptes d'exploitation successifs. C'est, en fait, une espérance mathématique ramenée en valeur actuelle. La question se pose alors de savoir si le prix présent du charbon est une mesure convenable de p_c . Trois facteurs semblent apporter un risque de hausse : la nécessité d'importations que la conjoncture mondiale ou des décalages de change peuvent rendre onéreuses, l'épuisement progressif de nos réserves de houille, la demande croissante de charbon comme matière première des industries chimiques. Sans doute serait-il sage, dans ces conditions, d'adopter, comme l'ont suggéré MM. DESSUS et FLEURQUIN ⁽²⁾, un prix d'ordre p_c comportant une prime sur le prix actuel du charbon.

3° Les réservoirs sont un moyen efficace, mais coûteux, de déplacer la production dans le temps pour l'adapter au diagramme, supposé fixe, des besoins. Or, cette adaptation peut se faire en sens inverse par la voie de tarifs déplaçant la consommation vers les époques de fortes disponibilités. Bien entendu, cet effort tarifaire a été entrepris de longue date, et commande dans une large mesure la marche de l'électrochimie et de l'électrometallurgie. Mais l'exemple de l'Italie amène à se poser la question de savoir s'il ne serait pas possible d'aller un peu plus loin. Tant que le problème d'ajustement optimum de l'équipement et des tarifs ne pourra pas être considéré comme pleinement résolu, une certaine prudence devra être observée dans l'application des équi-

valences théoriques correspondant à la forme actuelle du diagramme de consommation.

★★

5° Les régimes hydrologiques.

Parmi les directives de principe que nous avons à nous fixer figurent celles touchant la préférence à donner, toutes choses égales d'ailleurs, à tel ou tel des régimes hydrologiques français.

Au point de vue de l'**abondance**, les Alpes et les Pyrénées l'emportent avec un module de 25 à 40 l./s./km² (sauf dans les Alpes méridionales et les Pyrénées orientales).

Le Massif Central est nettement en retrait avec un module allant de 10 à 25 l./s./km² (les bassins les mieux arrosés étant ceux largement ouverts aux vents atlantiques, comme celui de la Dordogne).

Au point de vue de la **qualité**, c'est-à-dire de l'aptitude à desservir la consommation, la comparaison est plus complexe. Considérée isolément, une chute est d'autant meilleure que l'allure saisonnière de son régime épouse plus étroitement l'allure saisonnière de la demande, et que d'autre part elle a, d'une année à l'autre, des fluctuations de débit plus réduites. Mais c'est là, si j'ose dire, une définition qualitative de la qualité. Lorsqu'on cherche à la préciser, les difficultés commencent. Par exemple, sous l'aspect saisonnier, le Massif Central l'emporte sur les Alpes grâce à ses hautes eaux d'hiver, qui concordent avec le maximum annuel de consommation. Mais, sous l'aspect interannuel, les Alpes reprennent la primauté grâce au rôle régulateur des glaciers dont la fonte s'accroît en année sèche. Lequel des deux avantages l'emporte sur l'autre ? On ne peut rien répondre a priori.

Il faut en outre tenir compte, comme je l'ai déjà indiqué, du fait fondamental de l'interconnexion. Une chute n'est pas un instrument isolé, mais une petite partie d'un grand orchestre. De même qu'il y a compensation des régimes, il y a complémentarité des valeurs. En définitive, les chutes les plus intéressantes sont celles qui ont de l'eau quand les autres n'en ont pas.

Cherchons à préciser quantitativement les indications qui précèdent.

Le fil de l'eau du Massif Central, considéré isolément, est singulièrement inapte à desservir la consommation à cause de ses très bas débits

(1) M. HALPHEN donne deux raisons de son choix : « Nous pensons d'abord que l'économie de charbon que l'on pourrait réaliser par la première consigne d'exploitation ne compensera généralement pas le suréquipement qu'elle nécessite ; en second lieu, confessons que c'est la seule consigne qui se prête au calcul mathématique sans complications inextricables. » (Annuaire Hydrologique de la France, année 1945 : « Un exemple d'application des méthodes statistiques : Le problème du plan de développement de la production d'énergie électrique »).

(2) « Quelques problèmes relatifs à l'utilisation du gaz et de l'électricité en France », par MM. DESSUS et FLEURQUIN. Conférence Mondiale de l'Énergie, Session spéciale de La Haye, 1947. L'Économie des Combustibles.

d'été sec. Il faudrait une usine de **900** millions de kWh pour desservir un réseau de 100 millions de kWh.

Le fil de l'eau alpestre, considéré lui aussi isolément, se présente un peu moins mal. Pour notre réseau de 100 millions de kWh, il faut une usine de **400** millions.

Mais la conjugaison des régimes est encore préférable, l'usine nécessaire tombant à **250** millions de kWh. C'est le bénéfice de la complémentarité.

Que se passe-t-il maintenant si l'on adopte le point de vue **marginal**, c'est-à-dire si on ajoute au système de production actuel une usine différentielle au fil de l'eau de tel ou tel régime ? Disons tout de suite que l'usine nécessaire tombe à moins de **200** millions de kWh, parfois à **150**, dans des cas exceptionnels à **100**.

M. HALPHEN a calculé, sous certaines hypothèses, les valeurs en garantie et valeurs en production (ou en charbon) d'usines établies sur différents cours d'eau ⁽¹⁾. Ces valeurs, rapportées à la puissance normale disponible, constituent les indices-garantie et indices-production. Voici quelques chiffres, touchant l'indice-garantie *g*, le plus significatif.

Pour l'Arve et l'Isère supérieure, *g* est de l'ordre de 0,50 ; pour le Rhône, le Rhin et les rivières de l'Ouest du Massif Central (Dordogne, Truyère), *g* varie de 0,60 à 0,65 ; la Garonne en plaine approche de 0,70 ; la Loire et l'Allier supérieurs ont un *g* compris entre 0,90 et 0,95 ; enfin, le Tarn supérieur dépasse très légèrement l'unité.

Les chiffres de M. HALPHEN, ou plutôt l'interprétation à leur donner, ont fait l'objet de quelques réserves : les statisticiens calculent en effet sur les débits naturels, alors que les hydroélectriciens raisonnent sur les débits écrétes. Quoi qu'il en soit d'ailleurs de ces observations, dont l'avenir précisera la portée, je conclurais volontiers, non pas que les Alpes et le Massif Central se valent, mais que nous n'avons pas aujourd'hui de raison décisive de faire pencher la balance pour l'un ou pour l'autre, dans la mesure bien entendu où le coût d'équipement rapporté à l'unité de production est le même dans les deux cas. Cela signifie que, d'instinct, nos devanciers avaient réalisé un équilibre correct entre les deux régions.

Je crois, par contre, qu'il faut retenir, parce que d'un ordre de grandeur significatif, l'indication donnée en faveur des **cours d'eau à régime discordant**, c'est-à-dire soumis aux influences méditerranéennes, comme les têtes de bassins de la Loire, de l'Allier et du Tarn.

★★

6° La modulation journalière.

Jusqu'à présent, nous n'avons raisonné qu'en **énergie**. La demande était caractérisée pour nous par l'énergie totale désirée pendant une certaine période (jour, semaine ou mois), sans avoir égard aux variations de la **puissance** désirée d'un instant à l'autre de la journée. Or, les besoins d'électricité varient considérablement d'une heure à l'autre. Le diagramme journalier n'est pas constitué par une droite horizontale, mais par une courbe de forme complexe qui comporte deux pointes, l'une le matin, l'autre le soir, séparées par un creux accentué au cours de la nuit et un creux moins prononcé au milieu de la journée. Notre système de production doit ainsi pourvoir non seulement à l'adaptation saisonnière de la production d'énergie à la demande, mais aussi à l'adaptation instantanée de la puissance aux besoins.

Les usines thermiques et les usines hydrauliques à réservoir saisonnier ont une souplesse de marche qui leur permet de s'adapter à ce rôle dans la limite de leur équipement en machines. Mais à leur côté apparaît un instrument nouveau, le **réservoir à court terme** (journalier, hebdomadaire, voire mensuel) qui, sans efficacité pour la régularisation saisonnière, a pour raison d'être essentielle la modulation journalière des débits. Une différenciation se produit ainsi dans la catégorie au « fil de l'eau » : il faut y distinguer d'une part les usines au fil de l'eau pur, dépourvues de toute accumulation, et fonctionnant à puissance pratiquement constante au cours des 24 heures, d'autre part les usines d'écluse dont la puissance peut varier au cours de la journée dans la limite de leur capacité d'accumulation et de leur débit équipé.

Il est intéressant de comparer, au point de vue du rôle de ces différents moyens de production, un diagramme de hautes eaux et un diagramme d'hiver sec. Dans le premier, l'énergie hydraulique (fil de l'eau pur et éclusée) est à la base du diagramme, et l'énergie thermique au sommet.

(1) Les calculs de M. HALPHEN sont antérieurs aux trois dernières années. Ils auront à être revus pour en tenir compte.

Dans le second, le fil de l'eau pur et la thermique sont à la base, l'éclusee au sommet ⁽¹⁾, et le destockage des réservoirs saisonniers dans une position intermédiaire.

On peut, dès lors, développer pour les usines d'éclusee le même raisonnement que pour les autres instruments de production. A l'équilibre, toute substitution à un bassin journalier d'équipements d'une autre nature doit, à consommation et garantie constantes, annuler la différentielle première du coût et rendre positive la différentielle seconde. En particulier, par la voie de la substitution thermique, on peut définir une valeur en garantie et une valeur en charbon des bassins journaliers.

Il faut toutefois prendre garde au fait que le problème de la modulation journalière se pose en termes différents selon qu'il y a ou non, en hiver sec, surabondance de la somme « fil de l'eau pur + thermique » par rapport aux besoins des heures de nuit. Dans l'affirmative, les heures creuses sont des heures « non critiques » et le reste de la journée constitue au contraire une « période critique » au sens donné plus haut à ce terme. Dans la négative, toutes les heures de la journée sont critiques en hiver sec.

Dans le premier cas, grâce à la concentration des débits sur la période critique, l'adjonction d'un bassin journalier à une usine au fil de l'eau accroît sa valeur en garantie. Dans le second cas, la valeur en garantie n'est pas modifiée par cette adjonction ; il ne reste au crédit du réservoir qu'un supplément de valeur en charbon. Or, du fait de l'accroissement de la part de l'hydraulique et de celui, encore plus prononcé, de la part des réservoirs, la période critique journalière tend à s'allonger. Elle est montée depuis quelques années de 14 h. à 16 h. par jour, et il suffirait d'un faible accroissement relatif de la consommation de nuit et de la part de l'hydraulique pour la faire passer à 24 heures. Ces considérations ne valent toutefois que pour le réseau français considéré isolément. Dans une interconnexion européenne, la part du thermique serait probablement suffisante pour empêcher la période critique de s'étendre aux heures de nuit.

La valeur de la modulation journalière dépend ainsi d'une appréciation délicate à porter sur l'avenir.

★★

7° Le pompage.

Le pompage n'est en principe qu'un moyen de parfaire l'alimentation d'un réservoir dont les apports naturels et ceux dérivés par gravité n'assurent pas le remplissage.

Au débit de l'opération, il faut inscrire des charges d'investissement et des pertes d'énergie, le rendement du pompage étant inférieur à l'unité.

A son crédit, il faut inscrire la valorisation de l'énergie par son transfert dans le temps, qui procure à la fois de la valeur en garantie et de la valeur en charbon, et, le cas échéant, l'avantage d'une hauteur de restitution supérieure à la hauteur de refoulement (Le Portillon, Le Pouget, Cap de Long).

On a ainsi à faire, dans chaque cas d'espèce, un bilan économique.

Ce qu'on peut dire a priori, c'est que le pompage saisonnier est plus intéressant que le pompage journalier parce qu'il permet de tirer parti de marges de valeur plus importantes. On peut ajouter que l'intérêt du pompage journalier sera encore réduit dans l'avenir, comme l'a fait observer M. AILLERET, par la fermeture de l'éventail thermique. On ne pourra plus faire état dans sa rentabilité « d'une économie de charbon obtenue en pompant avec de l'énergie thermique produite de nuit par les centrales économiques pour restituer de l'énergie de pointe en substitution des thermiques les plus coûteuses ». On ne sera donc pas surpris de le voir écarté des programmes actuels. Le pompage saisonnier lui-même ne doit être développé qu'avec prudence, lorsque l'accumulation qu'il complète est particulièrement économique ou qu'il y a gain de hauteur appréciable à la restitution.

★★

8° La taille des équipements.

Les premières usines hydroélectriques ont été des usines-dérivation établies soit dans les vallées principales, soit sur des torrents secondaires tombant de vallées glaciaires suspendues. Le

(1) Parce qu'il lui correspond une forte puissance installée et une faible quantité d'énergie

premier cas est celui de l'Arc et de la Romanche, le second celui de Lancey, du Bâton, de Calypso. L'un associe à un fort débit une chute relativement faible, l'autre associe à une haute chute un petit débit. On n'obtient jamais que des **puissances d'importance moyenne**.

Celles-ci, suffisantes il y a un demi-siècle, furent progressivement débordées par la croissance des besoins, les progrès de la technique, le développement de l'interconnexion. L'idée vint alors de **collecter** les eaux de plusieurs torrents secondaires par une galerie reliant les prises établies aux divers points de rupture de pente, et de les utiliser dans un **système unique** de conduites forcées et de turbines, afin de réaliser des économies de premier établissement et d'exploitation.

La même tendance s'est manifestée en matière de réservoirs. Les réservoirs classiques d'avant-guerre (Sautet, Chambon, Sarrans, Lac d'Oo) sont uniquement alimentés par leur bassin versant naturel.

Mais les sites favorables à l'établissement de grandes réserves sont rares. Il faut en effet une cuvette spacieuse et étanche, un verrou facile à fermer, une fondation et des appuis convenables, des submersions économiquement et humainement possibles, le tout à une cote élevée (car, pour nous, ce n'est pas la réserve en eau qui compte, mais son potentiel énergétique). Il faut enfin que la cuvette soit alimentée par des apports suffisants.

Or, si les premières conditions sont sine qua non, on peut suppléer à la dernière par la **collecte** des eaux des bassins versants voisins. C'est ce qu'on avait fait avant la nationalisation à Cail-laouas, au Portillon, à la Bissorte, à la Girotte. C'est ce qu'on essaie aujourd'hui sur une échelle un peu plus large, à Cap de Long, au Pouget, à Roselend.

La question se pose alors de savoir **jusqu'où l'idée peut être poussée**.

Peut-on l'extrapoler tant que la collecte reste **physiquement possible**, ou rencontre-t-on une **limite économique**? En d'autres termes, y a-t-il une **taille optimum des aménagements**, basée sur des considérations de prix de revient et de division des risques?

La notion de taille optimum est familière aux économistes. Elle s'applique à des organismes aussi divers qu'une fabrique, un gratte-ciel, une cité. Il y a de sérieuses raisons de penser qu'elle s'étend aux équipements hydroélectriques :

1° L'alimentation d'un réservoir par collecte a cette infériorité sur l'alimentation naturelle qu'elle exige un réseau de galeries largement dimensionnées, et qu'elle laisse échapper, malgré cela, les très hautes eaux d'orage et de fonte des neiges.

2° Elle conduit, au delà d'une certaine limite, à **payer deux fois**, parce qu'il faut, en même temps qu'on allonge les branches, élargir le tronc.

3° Elle produit une modification du cours des eaux dont les conséquences agricoles et humaines augmentent rapidement avec son étendue.

4° Les sujétions d'établissement des prises secondaires conduisent à les placer tantôt trop haut, tantôt trop bas par rapport au réservoir principal.

Trop haut : c'est le cas de Tré la Tête par rapport à La Girotte.

Trop bas : c'est le cas du Lac Bleu par rapport au Portillon, de la Claire par rapport à Cap de Long, du Viaur par rapport à Pareloup.

On est alors conduit à installer tantôt des stations de pompage, tantôt des usines secondaires récupérant les hauteurs de chute perdues, ce qui est contraire à la philosophie du système.

La conclusion de cette analyse, c'est que le drainage d'un massif au profit d'un grand réservoir est intéressant dans un certain rayon, les avantages de régularisation des eaux et de concentration des ouvrages l'emportant sur les inconvénients de la collecte. Mais au delà, les avantages sont de plus en plus réduits et les inconvénients de plus en plus lourds. Les galeries s'allongent du côté des branches et s'élargissent du côté du tronc ; les points obligés (prises d'eau, franchissement de vallées et de mauvais terrains) conduisent à des pertes de hauteur de chute ; on est amené à multiplier les installations auxiliaires (petites usines et stations de pompage, avec accès, logements, postes et lignes de transport) et à enlever ainsi au système la simplicité idéale qui était son aspect le plus séduisant. Bref, il existe dans chaque cas un aménagement de taille optimum dont la détermination exige l'étude attentive et détaillée des circonstances de l'espèce.

★★

9° Le volume accumulé.

L'application des directives précédentes nous conduit à choisir un certain nombre de sites,

chacun d'eux étant caractérisé par ses apports naturels, sa hauteur de chute, ses possibilités d'accumulation. La tâche qui incombe maintenant aux services d'équipement est de préciser dans chaque cas le projet d'aménagement, et tout d'abord de choisir deux éléments fondamentaux, le volume accumulé et le débit dérivé.

Parlons d'abord du premier. Pour chaque site de réservoir, nous établissons la courbe du prix d'investissement marginal de l'accumulation (ce prix marginal comprenant non seulement la surélévation du barrage, mais aussi le surdimensionnement des ouvrages situés à l'aval, et, le cas échéant, les adductions complémentaires nécessaires pour le remplissage de la cuvette).

Cela fait, nous allons dans l'échelle des coûts croissants jusqu'au point où nous atteignons la capacité d'accumulation globale que nous nous sommes assignée (ou le prix d'investissement limite que des calculs d'optimum ont éventuellement permis de dégager).

La théorie semble ainsi nous conduire à l'égalisation des coûts marginaux. En fait, il est impossible d'échapper à une certaine dispersion. Il peut arriver d'abord, pour certains sites exceptionnels, que la limite des possibilités physiques soit atteinte pour un coût marginal inférieur à la limite économique. En sens inverse, on ne doit pas oublier que la limite économique est appelée, du fait de l'épuisement des sites les plus favorables, à se relever progressivement au cours du temps. Or, il est économiquement et pratiquement impossible de concevoir un barrage dont la hauteur croîtrait d'une manière progressive. Nous sommes ainsi conduits, dans certains cas, à dépasser la stricte limite actuelle et à anticiper avec mesure sur la situation qui nous paraît appelée à se réaliser dans un petit nombre de lustres. C'est encore une fois un problème d'équilibre entre le présent et le futur. Il se peut alors que si, dans trente ans, les prix-limites se trouvent avoir doublé ou triplé par rapport à nos estimations, nos successeurs soient conduits à surélever un barrage ou à le remplacer par un ouvrage nouveau (c'est ce qui arrive en Suisse pour la Dixence). Nous agissons sagement en réservant à cet égard le maximum de possibilités.

Pour ces raisons, nous ne devons pas tendre à l'uniformisation des coûts marginaux, mais simplement à leur harmonisation. Electricité de France a, depuis trois ans, accompli un travail utile dans ce sens, en évitant, dans certains cas, de forcer la nature, et dans d'autres d'en gâcher les virtualités.

Tout ce qui précède s'entend des réservoirs « faciles à remplir », c'est-à-dire de ceux dont le remplissage est assuré avec une probabilité voisine de l'unité par les apports extérieurs à la période critique. Ni l'expérience du passé, ni les travaux de M. HALPHEN ne nous renseignent en effet d'une manière suffisante sur la valeur économique des accumulations interannuelles. Ceci ne signifie pas qu'il ne faille jamais aménager de réservoirs interannuels, mais simplement qu'on doit s'engager dans cette voie avec prudence. Le cas se présente lorsque la surélévation du barrage est exceptionnellement économique au-dessus du niveau correspondant au remplissage saisonnier normal ; la constitution d'une tranche interannuelle servant de grand secours pour les années sèches peut alors être tentée : un cas typique est celui de Pareloup (usine du Pouget) où le mètre cube de béton permet d'emmagasiner 3.900 kWh contre 470 à la Bissorte, 380 à Sarrans, 260 au Chambon.

★★

10° Le débit équipe.

La question se présente d'une manière très différente, selon qu'il s'agit d'usines fonctionnant sans ou avec accumulation saisonnière. Dans le premier cas, le suréquipement de l'usine n'augmente en rien sa valeur en garantie. A ce point de vue, il y a en quelque sorte création d'une **fausse puissance**, l'équipement supplémentaire en machines n'étant pas gagé par un débit supplémentaire en étiage. Les usines d'écluse elles-mêmes ne doivent pas faire illusion à cet égard ; elles peuvent, il est vrai, produire une forte puissance pendant une demi-heure ou une heure en concentrant sur ce laps de temps leurs apports de 24 heures, mais cette puissance est insuffisamment étoffée en énergie pour être pleinement utile. L'intérêt du suréquipement est autre : c'est de produire des excédents de quatre à six mois permettant d'économiser du charbon ou d'alimenter des industries saisonnières. Sa valeur est ainsi moindre que celle de l'équipement de base, et si la question du suréquipement se pose, c'est que son coût, lui aussi, n'est qu'un coût partiel, les ouvrages de prise restant les mêmes et le coût des ouvrages de dérivation augmentant moins vite que le débit dérivé.

Un calcul strict conduirait à proscrire aujourd'hui le suréquipement dont la valeur marginale actuelle est presque toujours inférieure à son

coût marginal (puisque marginalement le système de production actuel déverse de deux à trois mois par an). La solution élégante consiste évidemment, lorsque c'est possible, à s'en abstenir aujourd'hui et à en réserver la possibilité pour l'avenir. Mais si elle est facile pour des usines-barrages comme Génissiat, L'Aigle, Chastang, elle n'est guère possible pour nos usines-dérivation sur le Rhône et sur le Rhin, comme Donzère-Mondragon, Kembs et Ottmarsheim, l'élargissement ou le doublement d'un grand canal latéral étant pratiquement exclu. On est amené, dans ce domaine comme dans celui de l'accumulation, à dépasser quelque peu l'optimum présent pour anticiper sur l'avenir. Si en effet **marginalement** l'usine nouvelle déverse trois ou quatre mois par an, le déversement **moyen** du système ne représente, même en hautes eaux, qu'un petit pourcentage du productible global. Quand l'usine nouvelle sera intégrée dans un ensemble plus vaste, on peut considérer que seul ce petit pourcentage de son productible déversera, même si les déversements marginaux subsistent.

Au contraire, les usines à réservoir saisonnier dont le fonctionnement est réduit, parfois même interrompu, en hautes eaux, ont leur puissance équipée conditionnée par leur contribution au passage des périodes difficiles. Cette puissance équipée doit tout d'abord être suffisante pour permettre à l'usine-réservoir de turbiner le jour le plus difficile la quantité d'énergie nécessaire pour l'équilibre de l'exploitation. Mais elle doit, en outre, concourir à la modulation journalière: autrement dit l'énergie destockée doit pouvoir être concentrée sur la période critique de la journée.

L'analyse de 1944 de M. AILLERET conduisait à fixer le débit équipé à la somme de deux éléments :

a) le débit résultant de la concentration des apports naturels d'hiver sec sur 14 heures par jour ouvrable ;

b) le débit résultant du destockage du réservoir à raison de 1/100^e de sa capacité d'accumu-

lation sur 14 heures, soit environ $\frac{1}{5.000.000}$ du volume accumulé.

Les études effectuées depuis lors n'ont pas fourni, à ce jour, d'éléments décisifs en faveur d'une modification sensible de cette règle.

J'ai envisagé jusqu'à présent deux cas extrê-

mes, celui de l'usine entièrement au fil de l'eau, et celui de l'usine en charge directe sous un réservoir saisonnier. On remarquera que lorsqu'on descend une vallée comme par exemple celle de l'Isère, on passe progressivement d'une nature d'usine à l'autre et, par suite, de l'un à l'autre des critères. Les usines de Brévières et de Malgovert, situées immédiatement à l'aval du réservoir de Tignes, ont vu leur débit équipé fixé en fonction du franchissement des hivers secs. Au contraire, l'usine de la Vanelle, située près de Romans, a vu son débit équipé fixé en fonction de la valeur marginale des excédents.

L'usine d'Aiguebelle se trouve dans une situation intermédiaire. Considérée comme usine au fil de l'eau, on l'aurait équipée pour un débit un peu inférieur aux 100 m³/s. prévus. En tenant compte du seul réservoir de Tignes, on serait également arrivé à un débit inférieur à 100 m³/s. Il a paru sage de dépasser dans une légère mesure l'optimum présent, pour tenir compte des nouvelles réserves aménageables dans le haut bassin de l'Isère en amont de Moûtiers. Le diamètre de la galerie a d'ailleurs été choisi de manière à correspondre à un décrochement de la courbe du prix de revient (d'une manière précise au chiffre le plus bas permettant l'installation de voies de un mètre pour l'évacuation des déblais).

★★

11° Le calcul des ouvrages.

Quand les caractéristiques essentielles d'un aménagement ont été définies, il reste à établir le projet des ouvrages. Les dimensions de ceux-ci résultent le plus souvent, comme je l'ai dit au début de cet exposé, d'un compromis entre économie et sécurité ; la notion d'espérance mathématique des risques est alors sous-jacente au calcul technique.

Dans d'autres cas, le compromis doit s'établir entre économie et rendement. Il en est ainsi lorsqu'on cherche à fixer les dimensions des ouvrages de dérivation : galeries, canaux et conduites forcées. Ces dimensions ne résultent pas automatiquement en effet du choix du débit dérivé ; dans un même ouvrage, on peut faire passer un débit variable suivant les pertes d'énergie que l'on admet.

L'optimum consiste alors à assurer la minimisation de la somme du coût de l'ouvrage et de la moins-value résultant des pertes d'énergie, les deux termes étant calculés soit en capital, soit

en annuité. Le calcul des pertes d'énergie, proportionnelles à chaque époque au cube (environ) du débit instantané exige qu'une prévision soit faite sur la marche de l'usine. En toute rigueur, d'ailleurs, une prévision parfaite est impossible, de sorte que la somme à rendre minimum se compose d'un élément de coût déterminé et d'un élément de moins-value qui a le caractère d'une espérance mathématique.

RÉSUMÉ

Nous avons vu comment on peut tracer les cadres généraux du Plan d'Équipement hydro-électrique, et quels critères peuvent être mis en œuvre pour apprécier l'intérêt respectif des différents projets.

Il n'est peut-être pas inutile de résumer en quelques mots les conclusions de notre analyse.

A) La cadence du Plan résulte de la confrontation des demandes et des ressources générales du pays ; elle doit, dans les circonstances actuelles, tendre à assurer autant que possible le plein emploi de notre potentiel spécifique d'équipement électrique, en particulier des moyens des constructeurs de matériel électro-mécanique.

B) La part du thermique ne découle pas d'un optimum propre à la production d'électricité, mais de la coordination des diverses sources d'énergie. Les électriciens doivent s'efforcer d'utiliser dans leurs chaufferies les bas produits de l'industrie minière, et les mineurs doivent s'efforcer de contribuer à la souplesse de marche des centrales électriques.

C) Il est intéressant de forcer dans une certaine mesure les aménagements de réservoirs, en se tenant dans les limites économiques découlant des taux marginaux de substitution. Une attention particulière doit être apportée aux rivières à régime hydrologique discordant (méditerranéen notamment), les seules considérations de qualité n'apportant pas, par contre, de raison décisive de choix entre les Alpes, les Pyrénées et le Massif Central (à coût d'investissement égal par kWh

produit). La tendance à l'accroissement de la taille des équipements est judicieuse, mais doit éviter la démesure et faire une place aux petites usines quand elles sont de construction économique et d'exploitation facile. Il est rationnel, enfin, de poursuivre l'équipement méthodique des grandes vallées, de manière à réaliser une utilisation continue de nos moyens d'entreprise et à bénéficier de l'effet des réservoirs de tête sur toute la hauteur de chute économiquement aménageable.

D) Dans le cadre de ces recommandations générales, les chutes à équiper doivent répondre à trois conditions :

1° se placer en bon rang dans la liste des indices de rentabilité

$$\frac{\text{(valeur en garantie + valeur en charbon)}}{\text{coût d'investissement}}$$

2° ne pas comporter d'aléas majeurs ;

3° ne pas compromettre l'utilisation d'un site offrant de larges possibilités d'avenir.

E) Les directives d'équipement doivent être périodiquement reconsidérées, d'accord entre tous les intéressés, de manière à s'adapter aux fluctuations de la conjoncture.

Je ne me dissimule pas qu'il y a une part de truisme dans les recommandations qui précèdent, et que certains seront tentés de conclure que l'analyse économique aboutit à de pauvres résultats. Ce ne serait pas entièrement équitable. Je crois sincèrement que nous sommes plus avancés qu'il y a dix ans. Nous ne sommes pas arrivés à du quantitatif au plein sens du terme, mais nous avons dépassé le qualitatif. Nous en sommes au stade des ordres de grandeur. Pour une discipline en formation, — et pour une discipline difficile, — ce n'est pas si mal. Il faut d'ailleurs reconnaître à l'analyse économique un autre mérite, celui d'inciter les constructeurs et les exploitants à réfléchir à la philosophie de leur métier. Si certaines études nous ont enrichis, les commentaires, les remarques et les critiques dont elles ont été l'occasion, nous ont apporté un enrichissement presque égal.

(à suivre)