

Les arcanes de l'épreuve écrite

PHILIPPE FICHO, ÉRIC GARNIER^[1]

En s'appuyant sur un support authentique, l'épreuve écrite nationale des sciences de l'ingénieur doit être élaborée à partir de problèmes techniques réels. Que doit-on évaluer et comment doit être conçue cette épreuve ? Voici toutes les clés pour réaliser un sujet.

L'examen du baccalauréat permet de vérifier chez les candidats l'acquisition de compétences définies par les programmes officiels pour entrer dans l'enseignement supérieur. C'est aujourd'hui clairement précisé, notamment pour les deux épreuves de sciences de l'ingénieur du baccalauréat scientifique. Elles doivent chacune permettre de valider une partie des compétences du programme tout en étant complémentaires. La figure 1 montre comment sont réparties ces compétences entre l'épreuve de projet et l'épreuve écrite.

Pourquoi une épreuve écrite ?

L'épreuve écrite, d'une durée de 4 heures, a pour objectif de vérifier, à travers l'analyse d'un système pluritechnologique et de sa modélisation, la compétence « analyser », et partiellement la compétence « modéliser », ainsi que les compétences associées définies dans le programme de sciences de l'ingénieur. Un sujet type est structuré autour de six tâches et doit amener le candidat à :

- analyser un système et vérifier ses performances ;
- proposer et valider des modèles ;
- analyser des résultats expérimentaux et leurs éventuels écarts par rapport au cahier des charges ou aux modèles ;
- proposer éventuellement des solutions pour réduire ou annuler ces écarts ;
- proposer des architectures de solutions, sous forme de schémas, de croquis, d'algorigrammes ou d'algorithmes ;
- synthétiser un ensemble de résultats obtenus.

Le programme de sciences de l'ingénieur étant construit sur l'évaluation d'écarts, l'épreuve écrite mobilise des compétences pluridisciplinaires pour

mots-clés
référentiel et programme, sciences de l'ingénieur, sujet d'examen

analyser les écarts entre les performances attendues, les performances mesurées et les performances simulées d'un système. Cette mobilisation de compétences pluridisciplinaires justifie l'existence de cette épreuve écrite, qui permet aussi de mobiliser des compétences de communication écrite spécifiques à la démarche de l'ingénieur.

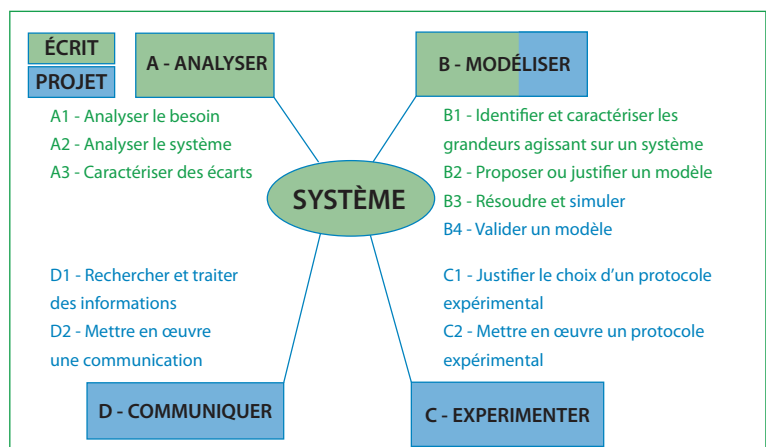
Comment évaluer des compétences dans le cadre d'une épreuve écrite ?

Une grille d'évaluation, publiée au *Bulletin officiel*, précise le découpage entre les compétences évaluées et les indicateurs de performance, afin de permettre aux évaluateurs de balayer un spectre suffisamment large de compétences que doit maîtriser le candidat 2. Le BO précise qu'au moins la moitié des indicateurs de performance définis dans la grille doivent être évalués lors de l'épreuve.

Lors de la correction des copies de baccalauréat, un outil numérique d'évaluation accompagne chaque copie. Le correcteur peut ainsi évaluer réellement des compétences, sans se préoccuper de la pondération relative à chaque question. Une fois la grille renseignée par le correcteur, la note finale sur 20 du candidat est automatiquement calculée.

Des objectifs scientifiques et techniques précis pour un sujet structuré

Un sujet de sciences de l'ingénieur doit permettre d'apporter des réponses à des questions – de type scientifique et technologique – en prenant appui sur



1 Les compétences évaluées dans chaque épreuve

[1] Respectivement : professeur de sciences industrielles de l'ingénieur en CPGE au lycée Chateaubriand à Rennes (35) ; IA-IPR de sciences et techniques industrielles dans l'académie de Nantes (44).

Compétences évaluées		Indicateurs de performance	évaluation				
			non	0	1	2	3
A. Analyser							
A1. Analyser le besoin	Définir le besoin, définir les fonctions de service, identifier les contraintes, traduire un besoin fonctionnel en problématique technique	La fonction globale est clairement précisée					
		Les fonctions de service sont définies sans omission					
		Les contraintes principales sont identifiées					
		Les contraintes sont ordonnées					
		La problématique technique est énoncée sans ambiguïté					
A2. Analyser le système	Identifier et ordonner les fonctions techniques qui réalisent les fonctions de service et respectent les contraintes, identifier les éléments transformés et les flux, décrire les liaisons entre les blocs fonctionnels	Les fonctions techniques sont identifiées sans omission et correctement ordonnées					
		Les flux et éléments transformés sont précisés					
		La frontière de l'étude est définie					
		Les blocs fonctionnels sont identifiés					
		Les liaisons entre les blocs fonctionnels sont décrites en conformité avec la nature des échanges					
	Identifier l'organisation structurelle, identifier les matériaux des constituants et leurs propriétés en relation avec les fonctions et les contraintes	L'organisation structurelle est définie					
		Les familles de matériaux sont identifiées					
		Les propriétés essentielles des matériaux constitutifs du système sont identifiées					
A3. Caractériser des écarts	Comparer les résultats expérimentaux avec les critères du cahier des charges et interpréter les écarts, comparer les résultats expérimentaux avec les résultats simulés et interpréter les écarts, comparer les résultats simulés avec les critères du cahier des charges et interpréter les écarts	Le modèle de simulation est conçu ou complété et validé de manière pertinente					
		Les critères essentiels du cahier des charges pouvant caractériser les écarts sont extraits					
		Les écarts sont quantifiés et expliqués au regard des données disponibles					
B. Modéliser							
B1. Identifier et caractériser les grandeurs agissant sur un modèle	Définir, justifier la frontière de tout ou partie d'un système, répertorier les interactions et choisir les grandeurs et les paramètres influents en vue de les modéliser	La frontière de l'étude est définie et justifiée					
		Les flux sont précisés (nature, grandeurs)					
		Un bilan énergétique du système est réalisé					
		Les interactions sont correctement qualifiées					
		Les principaux facteurs influant sur le comportement du système sont identifiés précisément					
B2. Proposer ou justifier un modèle	Associer un modèle à un système ou à son comportement, préciser et justifier les limites de validité du modèle envisagé	Le modèle proposé est justifié					
		Les paramètres sont choisis judicieusement					
		Les hypothèses simplificatrices sont précisées et justifiées					
B3. Résoudre et simuler	Choisir et mettre en œuvre une méthode de résolution	La méthode de résolution choisie est pertinente au regard du problème posé					
		La méthode de résolution est mise en œuvre sans erreur					


2 La grille d'évaluation de l'épreuve écrite

une démarche et des stratégies rigoureuses et bien définies. Il n'est plus question aujourd'hui, pour un candidat au baccalauréat S-SI, d'effectuer des calculs sans but précis, mais il est cependant nécessaire de savoir mobiliser des méthodes de résolution scientifiques pour répondre aux problèmes techniques posés.

Pour évaluer de manière efficiente un candidat au baccalauréat S-SI, le sujet doit donc proposer des hypothèses clairement définies et une modélisation adéquate. Cela doit amener les auteurs du sujet à élaborer les stratégies adaptées permettant au candidat d'aboutir à des résultats exploitables, favorisant ainsi un va-et-vient permanent entre des phases d'analyse et de synthèse.

Un ingénieur doit savoir rapidement trouver les mots justes et le bon outil représentatif pour convaincre. Un sujet de sciences de l'ingénieur, même au niveau du baccalauréat, doit donc permettre de tester les aptitudes du candidat à maîtriser ces compétences. Par la construction d'hypothèses et de conclusions, le candidat doit être amené à s'appuyer sur un raisonnement étayé scientifiquement et techniquement, et à argumenter à travers un discours technique clair et précis.

L'élaboration du sujet

Concevoir un sujet de sciences de l'ingénieur permettant de vérifier l'acquisition des compétences listées dans la grille  impose rigueur et allers-retours constants entre cette dernière et le texte du sujet.

Il va de soi, en sciences de l'ingénieur, que tout calcul doit être utile à l'atteinte d'un objectif. Le sujet n'est pas là pour jauger les connaissances pures des candidats, mais pour démontrer qu'ils savent les mobiliser pour construire leur démarche, juger d'une pertinence ou argumenter sur un résultat.

Il est donc indispensable que le sujet s'appuie sur le travail réalisé durant les deux années du cycle terminal du lycée, notamment en sciences de l'ingénieur, et qu'un élève d'une autre série ne puisse pas répondre à la problématique générale posée dans le sujet sans connaissance préalable. La documentation technique fournie est là pour compléter les savoirs des candidats.

Enfin, rappelons que les sciences de l'ingénieur sont des sciences et que le sujet valide donc des compétences scientifiques au même titre que pour les autres disciplines du baccalauréat général scientifique. Le support utilisé pour bâtir le questionnaire doit donc permettre de proposer une évaluation de ces compétences.

Un sujet de sciences de l'ingénieur doit obligatoirement être élaboré à partir d'une question sociétale, qui constituera la trame de la réflexion globale du candidat.

La première partie du sujet est une présentation du système pluritechnologique support de l'épreuve, le situant dans son contexte à l'aide en particulier de documents techniques accessibles rapidement

(photos, perspectives, dessins, schémas, éléments de maquettes numériques, etc.), des données du cahier des charges fonctionnel et des caractéristiques techniques.

Les principales problématiques liées à la conception, la réalisation, l'utilisation du support retenu sont présentées. Certaines justifieront le questionnaire proposé dans le sujet.

La construction de cette partie introductive nécessite une réflexion approfondie, afin de réaliser une présentation conforme à la démarche des sciences de l'ingénieur. En effet, *un sujet de sciences de l'ingénieur doit être sous-tendu par des problématiques réelles* et non se limiter à une succession d'exercices déconnectés les uns des autres.

Le sujet doit ensuite être découpé en quatre à six parties, chacune d'elles ayant un objectif technologique annoncé, et devant permettre d'aborder une problématique technique liée au support de l'épreuve. La dernière question de chaque partie doit impérativement permettre une réponse relative à l'objectif annoncé en début de partie.

Les écarts constituent une base incontournable de réflexion du candidat, et la dernière partie du sujet est nécessairement une synthèse, imposant la rédaction par le candidat d'une conclusion relative à la problématique générale de l'étude.

Le sujet doit bien montrer, à l'instar du programme, l'intrication des trois champs matériau, énergie et information.

Pour débiter le travail de rédaction d'un sujet de sciences de l'ingénieur, l'élaboration d'un plan d'action structuré est indispensable. Il s'agit de définir les compétences qui seront évaluées et de tisser la trame du sujet à partir de la problématique générale, déclinée en problématiques techniques propres à chacune des parties du sujet. Ce travail de réflexion amène à la réalisation d'un document structuré en sous-parties correspondant aux différentes parties du sujet, que l'on appelle tableau de bord.

Le tableau de bord est un moyen sûr de mener un questionnaire qui permette d'investir les champs de l'analyse, de la modélisation, du calcul et de la synthèse. Il permet de bien sérier les finalités de chaque partie, encapsulée entre un objectif clairement énoncé dans son introduction et une conclusion explicite sur l'objectif visé. Le tableau de bord guide les auteurs du sujet qui, à tout moment, peuvent vérifier que les objectifs de validation de compétences sont bien ciblés, et qu'un pourcentage important de celles-ci a bien été testé par le questionnaire.

Quand le tableau de bord est achevé, il ne reste plus que l'habillage à réaliser en nourrissant les questions des éléments indispensables à leur compréhension par le candidat, et en s'astreignant à fournir le juste nécessaire, afin de ne pas noyer le candidat dans un flot d'informations inutiles au traitement de la problématique définie dans l'introduc-

tion du sujet. S'appuyant sur le tableau de bord, les auteurs du sujet peuvent donc élaborer un questionnement structuré par un plan cadencé autour du fil rouge présenté en introduction.

Cette démarche de construction d'un sujet de sciences de l'ingénieur est bien entendu applicable à la construction de toute évaluation formative ou sommative. Elle est même recommandée. En s'imposant un cadre structuré et en effectuant un va-et-vient permanent entre le sujet en construction et les objectifs et les compétences visés, chaque professeur peut ainsi construire un sujet en parfaite adéquation avec les exigences du programme de formation concerné.

Le système support de l'épreuve

Le sujet doit être construit à partir de l'étude d'un produit technologique authentique, bien de consommation ou d'équipement. Il doit s'agir d'un système pluritechnologique représentatif des technologies actuelles dont la conception a mobilisé le travail d'ingénieurs. Ce n'est pas nécessairement un produit manufacturé mécatronique ; il peut être issu du domaine de la construction. Il doit surtout pouvoir intéresser des jeunes de 18 ans et leur être connu dans son contexte d'utilisation.

Enfin, la complexité du système doit permettre une évaluation des compétences sans risquer d'égarer le candidat dans une trop longue et difficile mise en contexte.

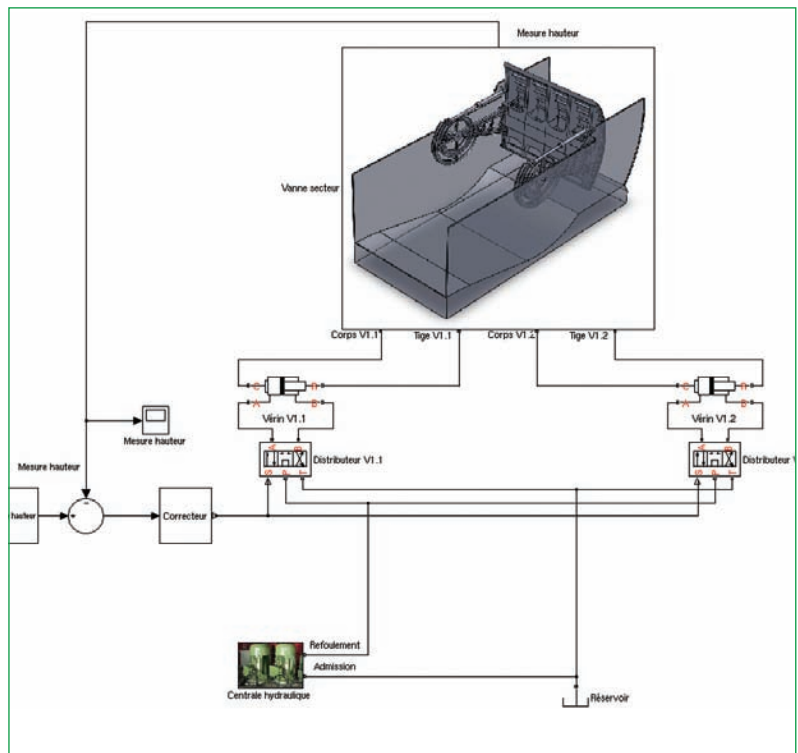
Un sujet de baccalauréat doit être un exemple de ce qui est attendu de la part d'un élève de fin de cycle terminal du lycée. À la fois sur le fond et sur la forme, le sujet doit être irréprochable. Son cadre est donc précisé aux auteurs bien en amont de sa conception :

- Introduction limitée à deux pages
- Étude limitée à 30 questions au maximum
- Documents techniques dûment identifiés et limités au juste nécessaire
- Nombre de documents réponses réduit également
- Orthographe et typographie (notamment scientifique) irréprochables

Le « sujet zéro »

Les deux versions du sujet zéro de sciences de l'ingénieur publiées sur Éduscol (<http://eduscol.education.fr/sti/epreuves/bac-s-si-sujet-0-retablissement-caractere-maritime-mt-st-michel>) ont été construites selon la démarche présentée ici. Pour aider les enseignants et les élèves dans son utilisation pédagogique, une analyse détaillée des sujets a d'ailleurs été réalisée dans la note d'accompagnement.

La réflexion des candidats autour des écarts est importante, une partie complète du sujet y a été dédiée. Ce n'est pas obligatoire, car cette analyse des écarts peut être menée au sein même des parties du sujet. Cependant, les auteurs ont souhaité mettre l'accent dessus pour en montrer l'importance et la place dans la réflexion et l'évaluation. N'oublions pas que les écarts sont inscrits au frontispice du programme de sciences de l'ingénieur.



3 Le modèle multiphysique de la fonction « mouvoir une vanne »

L'objectif de cette analyse des écarts entre le souhaité, le simulé et le réalisé est clairement indiqué au début de la quatrième partie du sujet. Le cadre de la réflexion proposée aux candidats est donc donné, et le questionnement nourrit celle-ci. Deux écarts parmi les trois seront étudiés. Pour cela, le cahier des charges auquel ont eu accès les auteurs a permis d'identifier des paramètres pertinents sur le rôle du barrage pour désensabler le mont Saint-Michel. Des résultats d'exploitation ont été fournis par la société qui gère le barrage ; ils ont permis d'étudier l'efficacité réelle de ce dernier.

Pour déterminer le dernier écart, les auteurs ont réalisé un modèle multiphysique de la chaîne d'énergie de l'ouverture et de la fermeture d'une vanne du barrage 3. Ils ont insisté sur cette modélisation afin de montrer explicitement la place prise par la modélisation multiphysique dans les sujets de l'épreuve écrite de sciences de l'ingénieur du baccalauréat scientifique.

Puisque plusieurs logiciels permettent ce type de modélisation, et, afin de ne pas pénaliser ceux qui ne connaîtraient pas celui utilisé, il est essentiel que le modèle intégré au sujet soit suffisamment documenté, afin que les candidats identifient précisément les composants et les transferts énergétiques ou informationnels. L'utilisation de « superblocs » pour masquer le détail de la modélisation est donc indispensable. L'insertion d'images est d'ailleurs recommandée pour rendre encore plus lisible (et agréable) le modèle proposé. C'est ce qui a d'ailleurs été réalisé par les auteurs du sujet zéro.

On notera que, dans cette partie, il est demandé aux candidats :

- d'identifier des couples de variables duales « effort » et « flux » dont le produit est une puissance ;
- de calculer une loi entrée-sortie pour compléter le modèle multiphysique ;
- de justifier l'utilisation d'un asservissement ;
- d'évaluer des écarts entre le « souhaité » et le « réalisé » et de les justifier ;
- de renseigner des paramètres du modèle multiphysique ;
- de quantifier des écarts entre le « simulé » et le « réalisé » et de qualifier le modèle.

La richesse du questionnement est ainsi mise au service de l'objectif énoncé en début de partie et de l'argumentation étayée que doivent mener les candidats lors de la rédaction des conclusions de chaque partie du sujet.

L'évaluation

Évaluer des compétences n'est pas une démarche habituelle pour les professeurs de sciences de l'ingénieur. La méthode couramment employée pour évaluer une copie consiste à noter pour chaque question le travail de l'élève (devenu candidat le jour de l'épreuve de certification) en regardant le résultat obtenu, mais également le cheminement suivi. Chaque question est ainsi évaluée séparément du reste de la copie. C'est d'ailleurs ce qui se passe lorsque, pour la correction de l'épreuve de sciences de l'ingénieur du baccalauréat, les correcteurs se partagent des groupes de questions et se communiquent les copies entre eux, chacun évaluant toujours le même ensemble de questions pour chacune des copies. Le correcteur n'a donc jamais un regard complet sur l'ensemble du travail réalisé par le candidat.

Bien évidemment, jusqu'à présent, la dichotomie ingénierie électrique - ingénierie mécanique était à l'œuvre : le « mécanicien » corrigeait seulement les questions liées à la mécanique, et l'électronicien ou l'électrotechnicien seulement les questions liées à son domaine d'expertise. L'esprit des sciences de l'ingénieur n'était donc pas respecté par la démarche de correction mise en application.

L'évaluation par compétences se veut aux antipodes de cette méthode. Dans l'idéal, une compétence doit être évaluée une seule fois, et son évaluation doit être binaire – compétence « finale » acquise ou non acquise – à partir de critères et d'indicateurs de performance. Dans la réalité, les choses se compliquent : l'administration impose une note pour l'épreuve, souhaitée également par le candidat et sa famille (même si le passage de la compétence à la note est idéalement impossible), les évaluateurs n'ont pas encore la culture de l'évaluation par compétences... Il faut donc essayer d'instaurer de nouvelles méthodologies de correction, tout en gardant l'esprit général insufflé par les

réformes actuelles autour de la pédagogie construite sur les notions de compétences.

De fait, la constitution d'un sujet conforme aux exigences du nouveau programme de sciences de l'ingénieur interdit dorénavant l'émission dans la correction de la copie d'un candidat. L'évaluation d'une copie de baccalauréat ne peut donc plus être disséquée en sous-parties confiées à plusieurs correcteurs. Tout correcteur doit absolument avoir une idée précise de la réflexion complète menée par le candidat pour répondre à la problématique sociétale énoncée au début du sujet. C'est pour cela que l'inspection générale de sciences et techniques industrielles a réalisé des grilles nationales d'évaluation basées sur les compétences du programme de sciences de l'ingénieur du cycle terminal du lycée. Deux grilles sont instituées, l'une pour l'évaluation de l'épreuve écrite, l'autre pour celle du projet interdisciplinaire. L'ensemble des compétences du programme est la réunion des deux grilles dont l'intersection est vide, marquant ainsi le rôle de chacune des deux épreuves.

Dans l'épreuve écrite, il semble naturel d'évaluer les 7 compétences proposées par la grille sans toutefois utiliser l'ensemble des 27 indicateurs de performance cités, les sujets, par nature différents les uns des autres, couvrant plus ou moins bien ces derniers. Les sujets étant divisés en questions, le problème posé à leurs concepteurs – et à l'équipe de pilotage nationale qui les accompagne – est de les relier aux indicateurs de performance et de fournir, à travers la grille nationale, un résultat sur 20 du travail du candidat.

Pour évaluer des compétences lors de la correction de l'épreuve écrite de sciences de l'ingénieur, le corrigé fourni aux évaluateurs sera, dès la session 2013 du baccalauréat scientifique, accompagné d'un outil numérique d'évaluation. Les compétences évaluées dans chaque copie seront donc saisies sur une grille numérique en temps réel. L'ensemble des données de chaque grille sera ensuite synthétisé dans un document numérique permettant de visualiser graphiquement les résultats des candidats à chaque partie du sujet, mais aussi de mettre en exergue les éventuelles difficultés rencontrées par les candidats lors de l'évaluation de certaines compétences.

Conclusion

Ainsi, grâce aux deux épreuves de sciences de l'ingénieur du baccalauréat général et aux nouveaux outils numériques d'évaluation, l'inspection générale de sciences et techniques industrielles disposera, dès la rentrée scolaire de septembre 2013, d'un instrument de pilotage et de régulation approprié. Les données chiffrées, très précises, permettront ensuite aux corps d'inspection territoriaux d'accompagner, dans les académies, les professeurs de sciences de l'ingénieur dans la construction de séquences pédagogiques efficaces et conformes aux attentes de la formation de futurs ingénieurs. ■